

Protactinium

Die Entdeckung des Elementes 91 durch Kasimir Fajans und Oswald Göhring im Jahr 1913 und die Namensgebung durch Otto Hahn und Lise Meitner 1918

Siegfried Niese, Wilsdruff

Einleitung

Im Jahr 1913 machten Physiker und Chemiker, die die anregende Atmosphäre von Ernest Rutherford in Montreal oder Manchester erleben konnten, bedeutende Entdeckungen. Niels Bohr entdeckte das Atommodell, Georg von Hevesy mit Fritz Paneth die Indikatormethode und Frederik Soddy brachte mit dem Begriff der Isotope Ordnung in die vielen seit der Entdeckung des Poloniums durch Marie Curie neu entdeckten radioaktiven Elemente, die keinen Platz mehr im Periodischen System der Elemente (PSE) fanden. In diesem Jahr entdeckte auch Kasimir Fajans mit seinem Doktoranden Oswald Göhring das Protactinium in Form seines kurzlebigen Isotops ^{234}Pa , dass sie wegen dessen kurzer Lebensdauer Brevium nannten. Nachdem fünf Jahre später Otto Hahn und Lise Meitner das langlebigen Isotop ^{231}Pa entdeckten, wurde ihnen auf der Nomenklatur-Konferenz der IUPAC 1949 in Amsterdam nicht nur die Namensgebung sondern auch die Entdeckung des Elementes zugeschrieben. So werden in der Literatur sowohl Fajans und Göhring als auch Hahn und Meitner als Entdecker genannt. Hier soll auf die Geschichte der Entdeckung des Protactiniums und darauf, wie Hahn und Meitner ihre Entdeckung beschrieben haben, eingegangen werden. Auch wenn das Verständnis für die Isotope damals noch nicht allgemein war, waren alle an der Entdeckung beteiligten mit dem Isotopenbegriff gut vertraut. Dafür dass man häufig Hahn und Meitner als Entdecker des Protactiniums bezeichnet, sind möglicherweise weitere Umstände verantwortlich. In diesem Zusammenhang soll nicht unerwähnt bleiben, dass Fajans bei einigen der bedeutenden Fachkollegen nicht sonderlich beliebt war. In dem Beitrag werden für die radioaktiven Elemente und Isotope der Zerfallsreihen die in jener Zeit üblichen Symbole und bei der erstmaligen Nennung die jetzt gültige Nomenklatur in Klammern angegeben.

Kasimir Fajans in Manchester

Kasimir Fajans wurde am 27. 5. 1887 in Warschau geboren und studierte nach dem Besuch des Realgymnasiums in Warschau ab 1904 an der Universität Leipzig Biologie. Unter dem Eindruck der großen Persönlichkeit von Wilhelm Ostwald wechselte er zur physikalischen Chemie und setzte sein Studium 1907 in Heidelberg bei Georg Bredig fort, wo er 1909 promovierte. Bei einem Studienaufenthalt bei Richard Willstätter in Zürich 1909/10 konnte er sich nicht richtig für die organischen Chemie interessieren, wechselte deshalb auf Anregung von Philipp Lenard zur Physik und ging zu einem Studienaufenthalt 1910 zu Ernest Rutherford nach Manchester, um sich mit Radioaktivität zu beschäftigen.

Bei Ernest Rutherford in Manchester weilten Wissenschaftler aus vielen Ländern zu Studienaufenthalten und Besuchen. Fajans traf dort u.a. die Engländer James Chadwick, Charles G. Darwin, Walter Makower, Henry G.-J. Moseley und John Mitchel Nuttal, den Russen G. N. Antonoff und den Ungarn Georg von Hevesy. Rutherfords Assistent Hans Geiger leitete den Einführungskurs in die radioaktiven

Methoden.¹ Als Fajans nach Manchester kam, war allgemein akzeptiert, dass die Radioaktivität auf der spontanen Umwandlung von Atomen unter Aussendung von positiv geladenen Heliumatomen, den α -Strahlen, und von Elektronen, den β -Strahlen, beruht. Man kannte in den drei radioaktiven Zerfallsreihen, bei denen Uran, Thorium und Aktinium über mehrerer radioaktive Elemente als Zwischenstufen unterschiedlicher Lebensdauer zerfallen, schon viel mehr Radioelemente als es Plätze im Periodensystem der Elemente gab. Auch wenn sich manche dieser in den Zerfallseigenschaften unterscheidenden Radioelemente chemisch nicht voneinander trennen ließen, wusste man noch nicht, dass es sich um Isotope gleicher Elemente mit unterschiedlichen Massen handelte.

Man kannte aus der Uranzerfallsreihe vom RaB (^{214}Pb) den zweimaligen Betazerfall über RaC₁ (^{214}Bi) und RaC₂ (^{214}Po) und nachfolgenden Alphazerfall zum Betastrahler RaD (^{210}Pb). Fajans untersuchte zusammen mit Makower in Manchester den Alphazerfall des RaC₁, wobei sie über dem radioaktiven Präparat eine Platte anordneten, auf der sich durch den Alphazerfall zurückgestoßenen Tochterkerne sammelten. Dabei beobachteten sie, dass RaD direkt aus RaC₁ zu entstehen schien, weshalb Fajans nach dem Alphazerfall ein für den Ladungsausgleich notwendiges betastrahlendes Zerfallsprodukt RaC' (^{210}Tl) einführte.² Danach fand er, dass das Verzweungsverhältnis für diesen zweiten Weg nur $3 \cdot 10^4$ beträgt. Damit hatte Fajans in Manchester eine Verzweigung der Zerfallsarten entdeckt, die auch in der Thorium- und der Aktiniumreihe nachgewiesen wurde. Nach einer solchen Verzweigung wurde später auch gesucht, um die Bildung des Aktiniums aus dem langlebigen Uranium herzuleiten.

Für die Einordnung der Radioelemente in das PSE spielt deren Valenz eine entscheidende Rolle. Hevesy versuchte diese durch Bestimmung von Diffusionskoeffizienten³ und deren Stellung in der Spannungsreihe zu ermitteln.⁴ Hevesy, der von der Elektrochemie zur Radiochemie gekommen war, wies darauf hin, dass sich Radioelemente aus Lösungen auf Metallplatten niederschlagen, wie es Willy Marckwald in Berlin mit RaF auf Wismut und von Friedrich von Lerch in Wien für die Trennung von RaC von RaB auf einer Nickelplatte demonstriert hatten, und schrieb: „Die Nernstsche Theorie der galvanischen Stromerzeugung verlangt, dass jedes Metall in reinem Wasser gebracht, wasserzersetzend wirken muss, denn andererseits würde die Gleichung $E = RT \ln(C/c)$ für den Potentialsprung den Wert unendlich annehmen“.

¹ Jozef Hurwic, Kasimir Fajans (1878-1975): *Lebensbild eines Wissenschaftlers* (Berlin 2000).

² Kasimir Fajans, „Über die komplexe Natur von Radium C“, *Physikalische Zeitschrift* 12 (1911) S. 369-378; Kasimir Fajans, Walter Makower, „Über den Rückstoß des RaC₂ im Vakuum“, *Physikalische Zeitschrift* 12 (1911) S. 378; Kasimir Fajans, Walter Makower, „The growth of Radium C from Radium B“, *Philosophical Magazine* 23(1912) S. 292-301; Kasimir Fajans, „Über die Verzweigung der Radiumzerfallsreihe“, *Physikalische Zeitschrift* 13(1912) S. 699-705.

³ Georg v. Hevesy, „Die Valenz der Radioelemente“, *Physikalische Zeitschrift* 14 (1913) S. 49-62; ders. „Die Eigenschaften der Emanationen“, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* 10 (1913) S. 198, sowie „Die Spannungsreihe der Radioelemente“, *Zeitschrift für Elektrochemie* 19 (1913) S. 29.

⁴ Georg v. Hevesy, „Radioaktive Methoden in der Elektrochemie“ *Physikalische Zeitschrift* 13 (1912) S. 715-719; ders. „Die Spannungsreihe der Radioelemente“ *Zeitschrift für Elektrochemie* 19 (1913) S. 29.

Dazu schrieb Fajans ⁵ Hevesy ⁶ bestätigend zitierend und die ältere Annahme von R. Lucas, dass „jede radioaktive Umwandlung zu einem Produkt führt, dass elektrochemisch edler ist als die unmittelbare Muttersubstanz“ korrigierend ⁷ dass das Zerfallsprodukt eines α -Strahlers positiver und eines β -Strahlers negativer als die Mutter ist.

Die Russell –Soddy - Fajanssche Verschiebungsregel bereitete den Weg zur Entdeckung des Elementes 91.

Der als Nachfolger von Fritz Haber zum Professor an die TH Karlsruhe berufene Georg Bredig bot 1911 Fajans die Stelle eines Oberassistenten an, der hier seine radioaktiven Arbeiten zur Radioaktivität fortsetzte und 1912 über die Verzweigung beim Zerfall des RaC habilitierte.⁸ Die Fragen der später als Isotope bezeichneten chemisch nicht trennbaren Radioelemente und die Bildung neuer Radioelemente beim radioaktiven Zerfall waren Gegenstand vieler Diskussionen in Manchester. Fajans formulierte Ende 1912 in zwei Arbeiten ⁹ wie Alexander Smith Russell ¹⁰ und unabhängig von und zeitgleich mit Frederick Soddy ¹¹ die nach ihnen benannten radioaktiven Verschiebungsgesetze, die beschreiben, wie sich bei einem radioaktiven Zerfall die Stellung des entstehenden Elementes im PSE dahingehend verändert, dass ein α -Strahlenübergang, wie schon Soddy schreibt, in die zweitvordere und ein β - Übergang in die folgende Gruppe des periodischen Systems führt. Da bei Betazerfall ein Elektron den Kern verlässt, nimmt die positive Kernladung um 1 zu und das entstehende Nuklid rückt im PSE einen Platz nach vorn. Beim Alphazerfall verliert der Kern zwei positive Ladungen und rückt im PSE um zwei Plätze zurück. 1913 wurde Fajans Privatdozent für physikalische Chemie.

Mit der alleinigen Publikation der Verschiebungsgesetze hatte sich Fajans den Unwillen einiger seiner Kollegen zugezogen. Hevesy fühlte sich dabei ausgenutzt, was er auch 50 Jahre später nicht vergessen hatte. In Beantwortung einer Anfrage von Fajans nach Briefen, die er Hevesy im Lauf ihrer seit ihrer Begegnung in der Hochschule in Zürich währenden Bekanntschaft geschrieben hatte, die Hevesy jedoch bei seinen vielen Umzügen nicht aufbewahrt hat, erinnert Hevesy Fajans daran, dass er im Frühjahr 1912 auf Fajans Bitte auf dem Wege von Manchester nach Budapest ihn in Karlsruhe besucht und bei dieser Gelegenheit von Russells Vortrag in Manchester über die „displacement laws“ [Verschiebungsgesetze] berichtet hat.¹² Hevesy hatte ihm dabei bereitwillig seine neuen Ergebnisse und Gedanken mitgeteilt und über die Diskussionen berichtet, die er in Manchester mit Russell geführt hatte. Hevesy hatte das auch in einem Brief an Rutherford

⁵ Kasimir Fajans, „Über eine Beziehung zwischen der Art einer radioaktiven Umwandlung und dem elektrochemischen Verhalten des betreffenden Radioelementes“, *Physikalische Zeitschrift* 14 (1913) S.131-136,

⁶ Georg v. Hevesy, „The diffusion of uranium“, *Phil. Mag.* 28(1912)628

⁷ R. Lucas, *Physikalische Zeitschrift* 7 (1906) S. 340

⁸ Kasimir Fajans, *Die Verzweigung der Radiumszerfallsreihe*, Habilitationsschrift, Karlsruhe (1913); desgl. *Verhandlungen des Naturhistorischen und Medizinischen Vereins zu Heidelberg*; sowie *Physikalische Zeitschrift* 13 (1912) S. 173-240.

⁹ Kasimir Fajans, „Über eine Beziehung zwischen der Art einer radioaktiven Umwandlung und dem elektrochemischen Verhalten des betreffenden Radioelementes“, *Physikalische Zeitschrift* 14 (1913)S. 131-136, ders. „Die Stellung der Radioelemente im periodischen System“, *Physikalische Zeitschrift* 14 (1913) S. 136-142

¹⁰ Alexander Smith Russell, *Chem. News* 107 (1913) S. 49-52

¹¹ Frederic Soddy, *Chem. News* 107 (1913) S. 97-99 und *Nature* 91 (1913) S. 634-635

¹² Hevesy an Fajans 19.1.1963, NBA

angedeutet, und Fajans in Briefen an seinen Freund Fritz Paneth mehrfach mit spöttischen Bemerkungen bedacht. In ähnlicher Weise äußerte sich auch der Direktor des Wiener Radiuminstituts Stefan Meyer. In einem Buch schreibt Russell später „Die Verallgemeinerung dieses Gesetzes erfolgte gleichzeitig von Russell, Soddy und Fajans“.¹³

1871 hatte Dimitri Mendeleev bei der Aufstellung des PSE zwischen Thorium und Uran ein fehlendes Element 91 vorausgesagt.¹⁴ Er nannte es Ekatantal (Et), weil es in seinem System unter dem Element Ta einzuordnen war. Es sollte die Atommasse 235 haben und ein Oxid Et_2O_5 bilden. Wie von Mendeleev vorausgesagt, sollte das Element 91 dem Ta ähnlich sein. Da sich beim Betazerfall die Kernladungszahl um 1 erhöht, musste aus dem durch Alphazerfall aus dem Uran (^{238}U) entstandene Thoriumisotop UX_1 (^{234}Th) ein Element der Kernladungszahl 91 entstehen, das seinerseits wieder unter Emission von Betastrahlen zerfallen sollte, um zum Uran II (^{234}U) mit der Kernladungszahl 92 zu gelangen. So folgerten sowohl Fajans als auch Russel,¹⁵ dass der Betastrahler UX mit den chemischen Eigenschaften des Thoriums und einer Halbwertszeit von 24,6 Tagen, bei dem bei der Absorptionsmessung der Betastrahlung zwei Komponenten mit wesentlich unterschiedlichen Energien gemessen wurden, ein Gemisch von zwei Nukliden (UX_1 und UX_2) sein muss.

Die Entdeckung des Elementes 91 in Karlsruhe

Fajans und Göhring suchten daraufhin das Radioelement 91 aus dem als Gemisch zweier Radioelemente angenommenen UX abzutrennen. Aus den Erfahrungen, dass in der Zerfallsreihe des Radiums aus den Radioelementen RaD (^{210}Pb), RaE (^{210}Bi) und RaF (^{210}Po) das durch Betazerfall entstehende Radioelement jeweils edler als das Mutterelement ist, gingen sie davon aus, dass auch das gesuchte UX_2 „das Element 91, edler als das UX_1 ist, und es sich deshalb besser als UX_1 auf Blei abscheidet. Sie gossen deshalb eine schwach saure Lösung von UX auf eine von Oxid befreite Bleischale und nach einiger Zeit wieder ab und brachten danach die Schale unter ein Elektrometer. In der durch aufeinanderfolgenden Messungen der Radioaktivität erhaltenen Abklingkurve identifizierten sie zwei Komponenten. Am intensivsten war ein kurzlebiges Nuklid mit der Halbwertszeit von ca. 1,1 min. Nach dessen Abklingen verblieb ein Rest mit der vom UX_1 bekannten Halbwertszeit von 24,6 Tagen. Über den somit erfolgten experimentellen Nachweis des vorausgesagten Elementes 91 schickten sie am 15. März 1913 eine kurze Mitteilung zur Redaktion der Zeitschrift *Naturwissenschaften* mit dem Titel „Über die komplexe Natur des UrX “, die am 4. April 1913 erschien.¹⁶ Sie schrieben: „Die Versuche.....führen uns in der Tat zur Auffindung eines neuen Elementes (UrX_2) mit einer Halbwertszeit von ca. 1,1 Min. [...]. Es sind Versuche im Gange, um zu entscheiden, ob das neue Element in der Tat der Tantalgruppe gehört, wie es Russel und Fajans geschlossen haben.“ Der Fajans - Biograf Josef Hurwic stellt die Entdeckung des Protactiniums

¹³ Alexander Smith Russell, John Andrews Benn, „Discovery of the Popular Journal of Knowledge“ in *Discovery* 1.1 (Cambridge 1938) S. 231, <books.google.de/books?id=Cgl-AAAAIAAJ> (05.02.2013)

¹⁴ Dimitri Mendeleev, „Die periodische Gesetzmäßigkeit der chemischen Elemente“. Aus dem Russischen von Felix Wreden, *Liebigs Annalen der Chemie, Supplementband VIII* (1871) S. 133-232, siehe S. 191

¹⁵ Alexander Smith Russell, „The periodic system and the radio-elements“, *Chemistry News* 49 (1913) S. 107

¹⁶ Kasimir Fajans, Oswald Göhring: „Über die komplexe Natur des UrX “, *Naturwissenschaften* 1(1913) 339.

als direkte Folge der Verschiebungsregel dar.¹⁷ Es bleibt offen, ob Fajans die UX₂-Abtrennung von UX zuerst durch elektrolytische Abscheidung und nicht durch Fällung mit Tantal unter dem Eindruck seiner vorangegangenen Experimente zur Elektrochemie der Radioelemente versucht hat oder weil ihm nicht sofort ein Tantalpräparat zur Hand war.

In der zweiten ausführlichen Publikation „Über das UranX₂ – das neue Element der Uranreihe“, die am 9.8.1913 in der Redaktion eingegangen war, und in der sie das UX₂ nicht nur im Text sondern auch in der Überschrift als neues Element bezeichneten, beschrieben sie, nachdem sie kurz auf die elektrochemische Trennung von UX₁ und UX₂ auf Blei eingegangen waren, ausführlich die zum Element 91 führende vorher angekündigte Abtrennung mit Tantaloxid. Von 500g Uranylinitrat, das sie von der Fa. Kahlbaum geliehen hatten, trennten sie zuerst Uran durch Schütteln mit Äther ab, fällten Thorium mit dem Isotop UX₁ mit Ammoniak, reinigten den Niederschlag von anhaftenden Uranionen durch Waschen mit Ammoniumkarbonat und lösten den Rückstand in Salzsäure. Daraus fällten sie das Thorium mit Oxalsäure und brachten den Niederschlag durch Abrauchen mit Salpetersäure wieder in Lösung. Daraus fällten sie nach Zugabe von Kalium-Tantal-Hexafluorid unter verschiedenen Versuchsbedingungen das sich aus dem UX₁ gebildete UX₂ (^{234m}Pa) aus. Bei dessen Messung konnten sie die kurze Halbwertszeit bestätigen und eine ziemlich harte Betastrahlung feststellen, während das verbleibende längerlebige UX₁ (²³⁴Th) nur eine weiche Betastrahlung emittiert. Weil das entdeckte UX₂ nur eine Halbwertszeit von 1,1min hatte, nannten sie das Element Brevium (Bv).¹⁸

Kurz zuvor beschrieben Hahn und Meitner in einer Publikation, die am 18. Juni 1913 in der Redaktion einging, Versuche „um die Existenz des von Fajans und Soddy neuentdeckten Urans X₂ zu bestätigen und eine einfache Methode zu seiner Herstellung aufzuführen“. Sie hatten zur besseren Abtrennung für das UX₁ etwas Thoriumnitrat zugegeben und das UX₂ nicht, wie es Fajans und Göhring in der Arbeit in den Naturwissenschaften als ihren nächsten Schritt angekündigt hatten, mit Ta aus der Lösung gefällt. Nachdem sie Tantaloxid (Ta₂O₅) in Wasser gekocht und auf diesen Niederschlag UX gegeben hatten, wurde darauf vorwiegend das UX₂ absorbiert.¹⁹ Hahn und Meitner wiesen in der Arbeit eindeutig auf Fajans und Göhring hin. Dass sie deren Mitteilung in den Naturwissenschaften nicht direkt zitierten, mag daran liegen, dass ihnen bei der Abfassung ihres Manuskriptes die Zeitschrift noch nicht vorlag. Ebenso wird es bei der o.g. Arbeit von Fajans und Göhring gewesen sein, die neun Wochen später bei der Redaktion einging; sowie bei einem Beitrag zur Stellung des Actiniums im Periodischen System.²⁰ In seiner Dissertationsschrift beschreibt Göhring ausführlich die Versuche zur Isolierung des UX₂.²¹ Wir können daraus noch entnehmen, dass Fajans und Göhring als besten Wert für die Abscheidung auf Blei ein Gemisch von 85% UX₂ und 15%UX₁ erhalten hatten. Bei den folgenden Versuchen zur Mitfällung des UX₂ war anfangs auch UX₁ mitgefällt worden. Nachdem sie dem UX etwas Thoriumsalz zugesetzt und so das

¹⁷ Jozef Hurwic, „La decouverte du brevium (protactinium 234) a partir de la loi des déplacements radioactifs“, *Revue d'histoire des sciences* 34(1981)359-361

¹⁸ Kasimir Fajans, Oswald Göhring, „Über das UranX₂ – das neue Element der Uranreihe“, *Physikalische Zeitschrift* 14 (1913) S. 877-884.

¹⁹ Otto Hahn, Lise Meitner, „Über das UX₂“, *Physikalische Zeitschrift*, 14 (1913) S. 758-759.

²⁰ Kasimir Fajans, Oswald Göhring, „Zur Frage nach der komplexen Natur des Radioactiniums und der Stellung des Actiniums im Periodischen System“, *Physikalische Zeitschrift* 14 (1913) S. 742-758.

²¹ Oswald Helmuth Göhring, *Über das neue Element Brevium und Versuche zur Auffindung seiner Isotopen*, Dissertation (Karlsruhe 1914).

Thoriumisotop UX_1 verdünnt hatten, konnten der Anteil an UX_1 , der mit dem Tantaloxid mitgefällt wurde, auf 0,2 % verringern werden. Somit hatten Fajans und Göhring im Jahr 1913, wenn auch in Form eines kurzlebigen Isotops, das Element 91 entdeckt.

Die Suche nach dem langlebigen radioaktiven Vorgängerelement des Actiniums

Es gab viele Versuche, das radioaktive Vorgängerelement des Actiniums aufzufinden. Es sollte dem Tantal ähnlich sein, eine sehr lange Halbwertszeit besitzen und, weil in der Pechblende die Aktivität des Actiniums der des Radiums und des Urans proportional ist, eine genetische Beziehung zum Uran haben. In seiner Dissertation und in einer weiteren Arbeit beschrieb Göhring auch die erfolglose Suche nach einem langlebigen Isotop, das als Ausgangsisotop der Actiniumreihe in Betracht zu ziehen wäre.²²

Lise Meitner und Otto Hahn suchten, indem sie dessen chemische Abtrennung verbesserten, ebenfalls nach einem langlebigen tantalähnlichen Mutterisotop des Actiniums sowohl in einer Uranprobe, die bereits 25 Jahre zuvor aus Pechblende abgetrennt worden war, als auch in der Pechblende selbst. Dabei fanden sie anfangs in der Tantalfraktion lediglich eine Anzahl bereits bekannter Radionuklide.²³

Vor dem Ersten Weltkrieg kannte man drei radioaktive Zerfallsreihen, die mit den Elementen Uran, Thorium und Actinium begannen. Da das Actinium im Gegensatz zu Uran und Thorium nur eine Halbwertszeit von 21,8 Jahren hat, musste es ein Vorläuferelement besitzen, dessen Halbwertszeit so groß war, dass es seit seiner Entstehung im Kosmos nicht schon zerfallen ist.

Die Entdeckung eines neuen in der Pechblende isolierten Elementes, das er Actinium nannte, wurde in Publikationen in den Jahren 1899 und 1900 von dem französischen Chemiker André-Louis Debierne beschrieben. Er schrieb dem Actinium erst eine Ähnlichkeit mit dem Titan²⁴ und dann mit dem Thorium²⁵ zu. Nach J. P. Adloff handelte es sich dabei nicht um das jetzige Actinium; sondern um ein Gemisch verschiedener Isotope des Thoriums.²⁶ Er zitiert in seinen Artikel über die Entdeckung des Actiniums u.a. auch einen Brief von Bertram B. Boltwood an Rutherford, der das von Debierne als neues Element Actinium bezeichnete Nuklidgemisch in diesem Sinne treffend beschreibt.²⁷

Im Jahr 1902 entdeckte Friedrich Giesel ein Radioelement, das nach seiner Meinung mit dem von Debierne entdeckten Actinium wegen seiner Ähnlichkeit mit Lanthan nicht identisch war.²⁸ Da es entgegen der Beobachtung von Debierne sehr viel

²² Oswald Göhring, "Einige Versuche zur Frage des Aktiniumursprunges, Z. Physik 15(1914) 642-645

²³ Hahn und Meitner, Phys. Z. 14(1913)738

²⁴ André-Louis Debierne: „Sur un nouvelle matière radio-active“, *Comptes rendus* 129 (1899) S. 593–595

²⁵ André-Louis Debierne: „Sur un nouvelle matière radio-actif l'actinium“ *Comptes rendus*, 130 (1900) S. 906–908

²⁶ J. P. Adloff „The centenary of a controversial discovery: actinium“, in: *Radiochim. Acta*, , 88(2000) S.123 -127, siehe auch C. Frey, M. Thoennessen, „Discovery of the actinium, thorium, protactinium and uranium isotopes“ in Rep. <ArXiv:1203.1194v1[nucl-ex]> (07.02.2013)

²⁷ Bertram Borden Boltwood, Letter to Rutherford, E., 23 Sept. 1907. In : *Rutherford and Boltwood, Letters on Radioactivity*, L. Badash, Ed., Yale University Press, New Haven and London (1969).

²⁸ Friedrich Oskar Giesel: „Ueber Radium und radioactive Stoffe“, *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, 35(3), (1902) S. 3608–3611, Friedrich Oskar Giesel: „Ueber den Emanationskörper (Emanium)“, *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft* 37(2) (1904) S.1696–1699, Friedrich

Emanation abgab, nannte er es „Emanium“. Nach einem im Jahr 1904 durchgeführten Vergleich von Präparaten von Debiere und Giesel wurden jedoch beide als identisch erkannt und Debiernes Namensgebung der Vorzug gegeben, da er das neue Element zuerst entdeckt hatte. Hevesy wies 1913 nach, dass das Actinium ein Homologes des Lanthans ist.²⁹ Er hatte auch Lise Meitner, mit der er im regen Briefwechsel stand, mitgeteilt, dass er die Diffusionskoeffizienten von Ac (^{227}Ac) und AcX(^{223}Ra) gemessen und daraus deren Wertigkeiten von 3 und 2 berechnet hat.³⁰ Damit war das Actiniums als dem Lanthan homolog bestätigt.

Beim Ausbruch des 1. Weltkrieges 1914 ging Hahn zusammen mit Fritz Haber an die Front, um den militärischen Einsatz von Giftgas zu erproben. Lise Meitner ging als Krankenschwester in ein Lazarett. Sie kehrte bald wieder ins Laboratorium zurück, um Experimente zur Trennung und Messung des Elementes 91 auszuführen. In dieser Zeit hat sie Hahn, der sie auch mehrfach im Labor aufsuchte, über die einzelnen Schritte ausführlich berichtet. Den dazu im Archiv zur Geschichte der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin-Dahlem aufbewahrten Briefwechsel hat Ruth Sime zusammengestellt.³¹ Ende Februar 1917 isolierte Meitner 2 g SiO_2 aus 21g Pechblende. Nach Zugabe von Kaliumtantalfuorid (KTaF_6) als Träger für das gesuchte langlebige Isotop des Elementes 91 zu 0,5 g des erhaltenen SiO_2 , löste sie dieses in Flusssäure auf und isolierte aus der Lösung Ta_2O_5 , worin das gesuchte langlebige Protactiniumisotop frei von Actinium enthalten sein sollte. Sie konnte dann durch Messung der Emanation des aus dem Element 91 gebildeten Actiniums nachweisen, dass sich mit der Zeit in der Tantalfraktion aus dem Actinium nachgebildet hatte. So fanden Otto Hahn und Lise Meitner 1918 das langlebigste Protactiniumisotop ^{231}Pa als Mutternuklid des Actiniums und überschrieben ihre Publikation „Die Muttersubstanz des Actiniums, ein neues radioactives Element von langer Lebensdauer“.³² Zur gleichen Zeit hatten auch F. Soddy und John Cranston nach einem langlebigen Isotop des Protactiniums gesucht und dieses auch nachgewiesen.³³

Hahn und Meitner gehen in ihrer ausführlichen Publikation³⁴ auch auf die Geschichte ihrer Entdeckung ein und wiesen darauf hin, dass Boltwood 1908 das Actinium in allen Uranmineralen in einem konstanten Verhältnis zum Urangehalt gefunden und deshalb auf einen genetischen Zusammenhang mit dem Uran geschlossen hat; sowie Russel in die Zerfallsreihe ein hypothetisches UrX_2 eingeführt, das Soddy EkaTa genannt hat. „Fajans und Göhring fanden tatsächlich ein β -strahlendes Umwandlungsprodukt des UrX , das UrX_2 oder Brevium, wie es von Fajans benannt wurde.“ In ihrer Arbeit zogen Hahn und Meitner folgende Schlussfolgerungen: „Von den 34 bisher bekannten radioaktiven Elementen stellen im chemischen Sinne neue Elemente nur das Radium, Actinium, Polonium, die Radiumemanation und das mit dem Protactinium isotope Brevium vor. [...] Hergestellt als chemisch reine

Oskar Giesel, „Ueber Emanium“, *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft* 38(1) (1905) S. 775–778.

²⁹ Georg v. Hevesy, Diffusion und Valenz der Radiumelemente“, *Physikalische Zeitschrift* 14 (1913) S. 1202

³⁰ Georg von Hevesy an Lise Meitner, 17.8.1913, *Niels Bohr Archiv*

³¹ Ruth Sime, „The Discovery of Protactinium“, *Journal of Chemical Education* 63 (1986) S. 653-657

³² Otto Hahn, Lise Meitner, „Die Muttersubstanz des Actiniums, ein neues radioactives Element von langer Lebensdauer“, *Physikalische Zeitschrift* 19 (1918) S. 208-218 und *Naturwissenschaften* 6 (1918) S. 324

³³ F. Soddy, J.A.Cranston, „The parent of actinium“, *Nature* 100 (1918) S. 498.

³⁴ Hahn, Muttersubstanz.

Individuen wurden bisher nur Radium und Radiumemanation. Vom Actinium konnte wegen der Seltenen Erden nicht einmal sein Spektrum aufgenommen werden, Po ist zu kurzlebig, desgleichen das Brevium. Beim Pa muß die Bestimmung von Spektrum und Atomgewicht bei der Verarbeitung großer Mengen voraussichtlich gelingen.“

Hahn und Meitner sprechen in der Überschrift ihres Beitrages von einem „neuen radioaktiven Element“. Im Text nennen sie als neue Elemente im chemischen Sinne Radium, Actinium, Polonium, Radiumemanation und das mit dem Brevium isotope Protactinium, wogegen die übrigen 28 bisher bei ihrer Entdeckung als neue Elemente bezeichneten radioaktiven Substanzen später wegen ihrer gleichen chemischen Eigenschaften als Isotope bereits bekannter Elemente erkannt wurden. Aus der Reichweite der α -Strahlen haben sie für das langlebige Protactiniumisotop eine Halbwertszeit zwischen 1200 und 180 000 Jahren abgeschätzt.

Rückblickend fasst Otto Hahn in seiner Autobiografie „Vom Radiothor zur Uranspaltung“³⁵ die Arbeit zur Entdeckung des Protactiniums³⁶ zusammen:

- „1. Die bisher hypothetische Muttersubstanz des Actiniums wurde aufgefunden und in radioaktiv reinem Zustande an Erdsäuren konzentriert hergestellt. Sie ist ein höheres Homologes des Tantals.
2. Sie sendet α -Strahlen vom Durchdringungsbereich 3,14 cm aus.
3. Die Halbwertszeit beträgt mindestens 1200 und höchstens 180 000 Jahre.
4. Die Nachbildung des Actiniums wurde bewiesen
 - a) durch Aufnahme von α -Strahlenkurven,
 - b) durch die Messung der Actiniumemanation, deren Zunahme sich seit Monaten von Tag zu Tag verfolgen lässt,
 - c) durch den activen Niederschlag, den wir in wachsenden Mengen an negativ geladenen Platten sammeln konnten.
5. Außerdem wurde der Curiesche Wert für die Halbwertszeit des Actiniums bestätigt.
6. Für das neue radioaktive Element wurde der Name Protactinium gewählt.“

Hahn berichtet von der gleichzeitig erschienen aber ihnen erst nach dem Kriege bekannt gewordenen Arbeit von Soddy und Cranston,³⁷ die die Muttersubstanz des Actiniums durch Sublimation aus der Pechblende abgeschieden haben und unter Annahme einer quantitativen Abscheidung für Ac eine Halbwertszeit von 3500 Jahren erhalten hatten. Sie hatten zugestimmt, dass Hahn und Meitner dem Ekatanal den Namen Protactinium gegeben haben. Hahn schreibt weiter: „Ganz korrekt ist dieser Name für das Element zwischen Uran und Thorium, also für das Element mit der Ordnungszahl 91, aber nicht. Die Entdecker des neuen Elementes UX₂ waren ja Fajans und Göhring. Sie hatten das Recht der Namensgebung und nannten es – wie schon mitgeteilt – wegen seiner kurzen Halbwertszeit Brevium. Das von uns entdeckte Protactinium mit einer Halbwertszeit von vielen tausend Jahren zugunsten des Namens Brevium aufzugeben, hat aber auch die Internationale Atomkommission nicht über sich gebracht. Ganz korrekt wäre also die Bezeichnung „Protactinium (Pa) das langlebige Isotop des Breviums“.

³⁵ Otto Hahn, *Vom Radiothor zur Uranspaltung*, Reprint der 1. Auflage, (Braunschweig 1962), hier S. 77.

³⁶ Hahn, Muttersubstanz.

³⁷ Frederick Soddy, J. A. Cranston, „The parent of actinium“, *Nature* 100 (1918) S.498; s.auch: *Proc. Roy. Soc. A* 94 (1918) S. 384-404.

Die später genauer bestimmte Halbwertszeit des ^{231}Pa von 32760 Jahren ist auch noch kurz im Vergleich zum Alter unseres Sonnensystem. Als Ausgangsnuklid einer Zerfallsreihe wäre auch ^{231}Pa längst zerfallen. Es dauerte dann noch viele Jahre bis man als dessen Mutternuklid das Uranisotop ^{235}U entdeckte, das gegenwärtig im natürlichen Isotopengemisch zu 0,7% vorhanden ist, aber bei der Elementbildung vor ca. 10 Mrd. Jahren das ^{238}U in der Häufigkeit bei weitem übertraf. Dabei hatten Piccard et al.³⁸ schon 1917 gefragt, ob man als Ausgangsisotop nicht ein noch nicht entdecktes Actinouran ansehen sollte. Das ^{235}U fand dann 1935 Dempster mit Hilfe der Massenspektrometrie³⁹. Das kurzlebige Mutternuklid des ^{231}Pa , das ^{231}Th , war bereits 1911 von G. N. Antonoff⁴⁰ als kurzlebiges thoriumähnliches UY entdeckt worden. Er nahm 1913 an, dass es nach einer Verzweigung das Ausgangsnuklid der Actiniumreihe ist.⁴¹

Das ^{231}Pa übersteigt in der Halbwertszeit das $^{234\text{m}}\text{Pa}$ um 10 und in der Masse in natürlichen Stoffen um 8 Größenordnungen und kann in wägbaren Mengen zur weiteren Untersuchung der chemischen Eigenschaften isoliert werden. Außerdem ist es das Mutternuklid des langlebigsten Actiniumisotops. Deshalb hat man mit Zustimmung von Fajans für das Element 91 den Namen Protactinium festgelegt. Das ändert aber nicht an der Tatsache, dass das Element Protactinium von Fajans und Göhring entdeckt worden ist, was auch Otto Hahn in seiner Autobiografie bestätigt.⁴²

Hahn hatte drei Jahre später in der aus dem UX_1/UX_2 -Gemisch abgetrennten Lösung neben dem kurzlebigen UX_2 noch ein längerlebigeres Nuklid (HWZ 6,7 h) mit gleichen chemischen Eigenschaften wie das UX_2 abgetrennt, das er UZ (^{234}Pa) nannte. Er hatte damit ein radioaktives Nuklid mit gleicher Kernladungs- und Massenzahl wie UX_2 und damit das erste Isomer entdeckt.⁴³ Er schrieb: „Es wird sich hier um einen dualen Zerfall handeln, bei der beide Äste durch eine β -Strahlungsumwandlung entstehen. Ein solcher Fall ist bis jetzt bei der radioaktiven Umwandlung noch nicht beobachtet worden“. Die Tragweite dieser Entdeckung wurde von den Kernphysikern erst spät erkannt. Für diese Entdeckung wurde Hahn von Max Planck für den Nobelpreis nominiert. In einer Autobiografie nannte Hahn diese Entdeckung später „seine beste Arbeit überhaupt“.⁴⁴ Das kurzlebige von Fajans und Göhring entdeckte Isomer wird seitdem als $^{234\text{m}}\text{Pa}$ und das längerlebige Isomer mit ^{234}Pa bezeichnet.

Die Entdeckung von Isotopen und der Umgang mit den Begriffen Element und Isotop bei Hahn, Meitner und anderen Wissenschaftlern ihrer Zeit

Nachdem Frederick Soddy die Radioelemente mit gleichen chemischen Eigenschaften zusammengestellt hatte⁴⁵, prägte er für die Radioelemente, denen auf Grund der gleichen chemischen Eigenschaften der gleiche Platz im PSE zusteht, den Begriff der Isotope.⁴⁶ Er erhielt dafür den Nobelpreis und ging in seinem Nobelvortrag

³⁸ Auguste Piccard et al., *Acta Scientiae Physique. et Naturelle Geneve* 41 (1917) S. 161-164.

³⁹ Arthur Jeffrey Dempster, *Nature* 136 (1935) S. 186.

⁴⁰ G. N. Antonoff, *Philosophical Magazin* 22 (1911) S. 419-432).

⁴¹ G. N. Antonoff, *Philosophical Magazin* 26 (1913) S. 1058.

⁴² Otto Hahn, Radiothor.

⁴³ Otto Hahn, „Über eine neue radioaktive Substanz im Uran“, *Berichte der Chemischen Gesellschaft* 54 (1921) S.1131.

⁴⁴ Klaus Hoffmann, Otto Hahn – Stationen aus dem Leben eines Atomforschers, Verlag neues Leben, Berlin 1978, S. 132.

⁴⁵ Frederick Soddy, „The Radioelements and the Periodic Law“, *Chemical News* 107 (1913) S. 97-99

⁴⁶ Frederick Soddy, *Journal of the Chemical Society* 99 (1913) S. 72

ausführlich auf den Erkenntnisprozess ein, der dazu führte.⁴⁷ In den natürlichen radioaktiven Zerfallsreihen fand man nach der Entdeckung des Radiums eine wachsende Zahl neuer radioaktiver Elemente, die man nicht auf die wenigen freien Plätze im PSE einordnen konnte und von denen sich mehrere voneinander damals chemisch nicht trennen ließen. So bezeichnete man bald einige Paare und kleine Gruppen als chemisch ähnlich oder chemisch nicht voneinander trennbar. Es begann mit der spektakulären Entdeckung des Mesothor, die den über eine Arbeit der organischen Chemie promovierte Hahn zur Chemie der radioaktiven Elemente führte. D. Strömsholm und The Svedberg bemerkten 1909, dass Ra (^{226}Ra), ThX (^{228}Ra) und AcX (^{223}Ra) „in rein chemischer Hinsicht außerordentlich ähnlich sind“ und wiesen diesen Elementen bereits damals ein und denselben Platz im PSE zu. Marckward bezeichnete Mesothorium und Radium 1910 als „völlig ähnlich“ und Soddy hatte 1911 nach dem erfolglosen Versuch, beide Elemente zu trennen, beide Elemente „praktisch identisch“ genannt. Rutherford hatte schon länger vorgeschlagen, nur das langlebigste der nicht voneinander trennbaren Elemente einen Platz im PSE zu geben. Die Gruppe solcher Elemente nannte Fajans Pleijaden.⁴⁸ Paneth und Hevesy zeigten, dass sich ThC gemeinsam mit Biswut und RaD gemeinsam mit Blei elektrolytisch abscheiden und erwähnten dabei die Feststellungen der vorgenannten Autoren.⁴⁹ Hevesy entwickelte aus der Tatsache, dass sich RaD nicht von Blei trennen ließ, die Idee der radioaktiven Markierung, die er gemeinsam mit Paneth im Wiener Radiuminstitut bei der Bestimmung der Löslichkeit von Bleichromat demonstrierte.⁵⁰ Damit begründeten sie die Indikatormethode und nach deren erfolgreichen Anwendung in Biologie und Medizin wurde Hevesy dafür 1943 mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet.

Zu den Begriffen Element und Isotop hat es im Schrifttum Kontroversen gegeben: Hevesy und Paneth schrieben: „F. Soddy war der erste, der der Ansicht scharf Ausdruck verlieh, das diese Radioelemente „chemisch und physikalisch praktisch identisch“ seien.“⁵¹ Daraufhin polemisiert Fajans gegen den von Paneth und Hevesy verwendeten zur Begründung der Indikatormethode sinnvollen Begriff der „Vertretbarkeit“, der zu „irrtümlichen Vorstellungen über die wahre Beziehungen zwischen den Isotopen Veranlassung gebe“...“streng genommen dürfte man die Nernstsche Formel nur auf jedes Plejadenglied getrennt anwenden“. Man erkennt, dass Fajans sich im Text nicht von seinem Plejadenbegriff trennen konnte.⁵² Daraufhin bemerkten Hevesy und Paneth, dass die Meinungsunterschiede nur Ausdruck einer unterschiedlichen Betrachtungsweise sind.⁵³ Hevesy war längst davon überzeugt, dass man prinzipiell auch Isotope wegen ihrer unterschiedlichen Masse trennen kann, was er zuerst mit der Diffusion in Lösungen versuchte, ihm dann später durch Destillation gelang.

⁴⁷ Frederick Soddy, „The origins of the conceptions of isotopes“, *Nobel Lecture*, December 12, in <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1921/soddy-lecture.pdf> (07.10.2012).

⁴⁸ Kasimir Fajans, *Physikalische Zeitschrift* 14 (1913) S. ???.

⁴⁹ Fritz Paneth, Georg v. Hevesy, „Über die elektrochemische Vertretbarkeit von Radioelementen“, *Mitteilungen aus dem Institut für Radiumforschung* Nr. 44 (Juni 1913).

⁵⁰ Georg v. Hevesy, Fritz Paneth, „Die Löslichkeit des Bleisulfids und Bleichromats“, *Zeitschrift für anorganische Chemie* 82 (1913) S. 322

⁵¹ Georg v. Hevesy, Fritz Paneth, „Zur Frage der isotopen Elemente“, *Physikalische Zeitschrift* . 15 (1914) S. 797.

⁵² Kasimir Fajans, „Zur Frage der isotopen Elemente“, *Physikalische Zeitschrift* 16 (1915) S. 45.

⁵³ Georg. v. Hevesy, Fritz Paneth, „Zur Frage der isotopen Elemente, Erwiderung auf die gleichnamige Abhandlung von K. Fajans,“ *Physikalische Zeitschrift* 17 (1916) S.4.

Die IUPAC schreibt die Entdeckung des Protactiniums Hahn und Meitner zu

Bei Wikipedia finden wir: „Protactinium was first identified in 1913 by Kasimir Fajans and Oswald Helmuth Göhring and named *brevium* because of the short half-life of the specific isotope studied, namely protactinium-234. A more stable isotope (^{231}Pa) of protactinium was discovered in 1917/18 by Otto Hahn and Lise Meitner, and they choose the name proto-actinium, but then the IUPAC named it finally protactinium in 1949 and confirmed Hahn and Meitner as discoverers.“ [Protactinium wurde zuerst 1913 von Fajans und Göhring identifiziert und wegen der kurzen Halbwertszeit des untersuchten Isotops $^{234\text{m}}\text{Pa}$ Brevium genannt. Ein stabileres Isotop (^{231}Pa) des Protactiniums wurde in den Jahren 1917/18 von Hahn und Meitner entdeckt. Sie wählten den Namen Proto-actinium, aber die IUPAC nannte es schließlich 1949 Protactinium und bestätigte Hahn und Meitner als dessen Entdecker].⁵⁴ Wir finden auch bei Wikipedia unter Lise Meitner die Formulierung: „Von 1917 an arbeitete Lise Meitner erneut gemeinsam mit Otto Hahn. Sie entdeckten im selben Jahr das chemische Isotop Protactinium 231, die langlebige Form des Elements Nr. 91, das mit dem schon 1913 von Kasimir Fajans und Oswald Helmuth Göhring entdeckten kurzlebigen Pa-Isotop Brevium in Konkurrenz stand.“⁵⁵ In diesem Sinne nennt auch Vladimir Majer in einem Lehrbuch Hahn und Meitner als Entdecker des Protactiniums.⁵⁶ Im Gegensatz dazu werden bei <www.periodensystem-online.de> Fajans und Göhring als Entdecker genannt.⁵⁷

Ruth Lewin Sime geht in ihrer Meitner-Biografie von Hahn und Meitner als Entdecker des Elementes aus, wundert sich aber, dass trotz ihrer gleichberechtigten Stellung im Institut und der Tatsache, dass Meitner fast die ganze Arbeit geleistet hat, sie Otto Hahn als Autor den Vorrang ließ, und schreibt „Bei ihrer Arbeit über das Protactinium glaubte sie vielleicht, dass sie ihm den Vorrang schuldete, weil er schließlich als Soldat seinem Vaterland gedient hatte“.⁵⁸

Die verwirrende Situation, dass von einem lange vorausgesagtes Element zuerst ein sehr kurzlebiges Nuklid und fünf Jahre später von einem anderen Team ein Isotop mit bedeutend längerer Halbwertszeit entdeckt wurde, führte dazu, dass in verschiedenen Schriften verschiedene Entdecker genannt werden. Das kann etwas mit dem sich ändernden Begriff des chemischen Elementes nach der Entdeckung der Isotope zu tun haben. Es kann aber auch daran liegen, dass Fajans nach der seine Fachkollegen brüskierenden alleinigen Publikation der Verschiebungsgesetze keine Fürsprecher besaß, die seine Entdeckung gebührend würdigten. Das Protactiniumisotop $^{234\text{m}}\text{Pa}$ und damit das Element Protactinium wurde als Glied der dem ^{238}U folgenden Zerfallsreihe von Fajans und Göhring entdeckt und an die richtige Stelle des PSE eingeordnet.

Eigenschaften und Bedeutung des Protactiniums und seiner Isotope

Der Assistent von Otto Hahn, Astrid von Grosse, führte anschließend die Abtrennung des ^{231}Pa aus Rückständen der Urangewinnung aus und gewann genügend Material,

⁵⁴ <<http://en.wikipedia.org/wiki/Protactinium>> (22.09.2012).

⁵⁵ <http://de.wikipedia.org/wiki/Lise_Meitner>, (13.09.2012).

⁵⁶ Vladimir Majer, *Grundlagen der Radiochemie* (Leipzig 1982) S. 413.

⁵⁷ < <http://www.periodensystem-online.de/index.php?id=history&el=91>> (12.09.2012)

⁵⁸ Ruth Lewin Sime, *Lise Meitner – Ein Leben für die Physik*, (Frankfurt a.M. und Leipzig 2001).

um einige chemischen und physikalischen Eigenschaften zu bestimmen.⁵⁹ Eine Übersicht über die Chemie des Protactiniums haben Myasoedov, Kirby und Tanaev zusammengestellt.⁶⁰

In den letzten Jahren des dem zweiten Weltkriegs und danach wurden für die Herstellung von Kernwaffen und die Erzeugung von Kernenergie größere Mengen Uran aus Erzen gewonnen, wobei die protactiniumhaltigen Rückstände der Aufbereitung meist in der Nähe der Fabriken in Senken abgelagert und mit Bodenschichten abgedeckt wurden. Auf Grund seiner kernphysikalischen und chemischen Eigenschaften wird ^{231}Pa als radiotoxischstes Nuklid noch vor den Isotopen des Plutonium, Americium, Actiniums und Radiums eingestuft, aber wegen seiner etwas komplizierten chemischen Abtrennung selten in Umgebungsproben bestimmt.

Das beim Neutroneinfang von Thorium über die Reaktion $^{232}\text{Th}(n,\gamma)^{233}\text{Th}$ entstehende Thoriumisotop hat eine kurze Halbwertszeit von 22,2min und zerfällt in das leicht messbare ^{233}Pa mit einer Halbwertszeit von 27 Tagen, welches erstmals von Meitner, Fritz Strassmann und Hahn durch Bestrahlung von Thorium mit Neutronen erhalten wurde⁶¹. Dieses erste künstlich erzeugte Protactiniumisotop wird bei der neutronenaktivierungsanalytischen Bestimmung von Thorium genutzt; insbesondere bei der Bestimmung von Spurenelementen in kosmischen und geologischen Proben.

Das ^{233}Pa zerfällt in das langlebige spaltbare Uranisotop ^{233}U , das in Thoriumbrutreaktoren eingesetzt werden kann. Das ist ein denkbarer Weg, um das im Vergleich zum Uran häufigere Thorium zur Energiegewinnung zu nutzen. Da hierbei eine aufwendige Abtrennung des gebildeten ^{233}U vom Thorium notwendig ist, wird dieser Weg, zumindest solange es noch ausreichende Uranvorkommen gibt, weltweit nicht gegangen. Auch bei dem in Deutschland kurze Zeit betriebenen Hochtemperaturreaktor wurde neben der Spaltung von ^{235}U auch das aus Thorium erbrütete ^{233}U zur Energieerzeugung genutzt.⁶²

Bei Verteilungsuntersuchungen von Thorium wird gelegentlich ^{234}Th als Indikatornuklid eingesetzt. Dabei wird die Betastrahlung dessen Tochternuklids $^{234\text{m}}\text{Pa}$ wegen seiner höheren Energie gemessen. Für die Bestimmung des ^{238}U kann nach Einstellung des radioaktiven Gleichgewichts das Gammaspektrum von $^{234\text{m}}\text{Pa}$ gemessen werden. Das mit $^{234\text{m}}\text{Pa}$ isomere ^{234}Pa wurde wegen seiner längeren Halbwertszeit von 6,7 h gelegentlich als Indikator bei der Abtrennung von Pa – Isotopen eingesetzt.

⁵⁹ Aristid von Grosse, „Das Element 91; seine Eigenschaften und seine Gewinnung“. *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*. 61 (1928) S. 233–245; Aristid von Grosse, „Element 91“ *Science*. 80 (1934) S. 512–516; Aristid V. Grosse, „Zur Herstellung von Protactinium“, *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft (A and B Series)*. 68 (1935) S. 307.

⁶⁰ Boris F. Myasoedov, Harald W. Kirby, Ivan G. Tananaev, *Protactinium*, in: (Ed.) Lester R. Morss, Norman M. Edelstein, Jean Fuger, *The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements* (Dortrecht 2006) S. 161-252.

⁶¹ Lise Meitner, Fritz Straßmann, Otto Hahn, „Künstliche Umwandlungsprozesse bei Bestrahlung des Thoriums mit Neutronen: Auftreten von isomeren Reihen bei Abspaltung von α -Strahlen“, *Zeitschrift für Physik* 109 (1938) S. 538-552.

⁶² <http://de.wikipedia.org/wiki/Kernkraftwerk_THTR-300, (08.02.2013)>

Protactinium

Es gibt noch eine größere Zahl künstlich erzeugte radioaktiver Isotope des Protactiniums, die aber nur von wissenschaftlichem Interesse sind.